

CAHIERS FRANÇOIS VIÈTE

Série III – N° 8

2020

*Rivages et horizons techniques des mondes atlantiques
au vingtième siècle*

sous la direction de
Ronei Clecio Mocellin & Pierre Teissier

Centre François Viète
Épistémologie, histoire des sciences et des techniques
Université de Nantes - Université de Bretagne Occidentale

Cahiers François Viète

La revue du *Centre François Viète*
Épistémologie, Histoire des Sciences et des Techniques
EA 1161, Université de Nantes - Université de Bretagne Occidentale
ISSN 1297-9112

cahiers-francois-viete@univ-nantes.fr
www.cfv.univ-nantes.fr

Depuis 1999, les *Cahiers François Viète* publient des articles originaux, en français ou en anglais, d'épistémologie et d'histoire des sciences et des techniques. Les *Cahiers François Viète* se sont dotés d'un comité de lecture international depuis 2016.

Rédaction

Rédactrice en chef – Jenny Boucard

Secrétaire de rédaction – Sylvie Guionnet

Comité de rédaction – Delphine Acolat, Hugues Chabot, Colette Le Lay, Cristiana Oghina-Pavie, François Pepin, David Plouviez, Pierre Savaton, Valérie Schafer, Josep Simon, Alexis Vrignon

Comité scientifique

Yaovi Akakpo, David Baker, Grégory Chambon, Ronei Clecio Mocellin, Jean-Claude Dupont, Luiz Henrique Dutra, Hervé Ferrière, James D. Fleming, Catherine Goldstein, Alexandre Guilbaud, Pierre Lamard, François Lê, Frédéric Le Blay, Baptiste Mèlès, Rogério Monteiro de Siqueira, Philippe Nabonnand, Karen Parshall, Viviane Quirke, Pedro Raposo, Anne Rasmussen, Sabine Rommevaux-Tani, Aurélien Ruellet, Martina Schiavon, Pierre Teissier, Brigitte Van Tiggelen



SOMMAIRE

Introduction

*Les mondes atlantiques dans le premier tiers du xx^e siècle.
Un essai d'interprétation*

Ronei Clecio Mocellin & Pierre Teissier

- MARION WECKERLE 15
Espaces techniques et aéronautiques : hydravions et frontières maritimes, 1910-1918
- ÉTIENNE DELAIRE & PIERRE TEISSIER 51
*Horizons, chaînes et rivages frigorifiques en France, 1900-1930.
Marchés alimentaires, modernités techniques et pêches industrielles*
- B. ROHOU, M. DE MARCO, G. CHALIER & M. PETERSEN 91
Modernisation de rivages techniques entre l'Argentine et la France : les ports de Rosario, Arroyo Pareja, Mar del Plata et Quequén (1900-1930)
- ANAËL MARREC 117
Rivages et horizons des énergies marines depuis les années 1970. Deux témoignages de chercheurs : Alain Clément et Philippe Marchand

Varia

- YANNICK CAMPION 155
L'Umweltraum de Jakob von Uexküll. Le signe, l'espace, le temps et les philosophes

Rivages et horizons des énergies marines depuis les années 1970. Deux témoignages de chercheurs : Alain Clément et Philippe Marchand

Anaël Marrec*

Résumé

Ces deux séries d'entretiens donnent la voix à deux acteurs historiques des énergies marines en France : Alain Clément, chercheur au Laboratoire d'hydrodynamique navale de l'École nationale supérieure de mécanique de Nantes, et Philippe Marchand, ingénieur et chef de projet au Centre national pour l'exploitation des océans. Depuis 1976, Alain Clément s'est impliqué dans la recherche et le développement des convertisseurs houlomoteurs. Philippe Marchand a dirigé, de 1978 à 1986, un programme national « Énergies marines » portant sur les énergies maréthermique, houlomotrice et marémotrice. Alain Clément et Philippe Marchand apportent à ce numéro plusieurs éclairages spécifiques par leurs projets de nouveaux rivages énergétiques structurés par des horizons techniques.

Mots-clés : histoire, énergies marines renouvelables, témoignages, recherche et développement, innovation, France.

Abstract

These two series of interviews give voice to two historical actors of marine energies in France: Alain Clément, researcher at the Laboratoire d'hydrodynamique navale of the École nationale supérieure de mécanique in Nantes, and Philippe Marchand, engineer and project manager at the Centre national pour l'exploitation des océans. Since 1976, Alain Clément has been involved in the research and development of wave engine converters. From 1978 to 1986, Philippe Marchand directed a national "Marine Energies" program on ocean thermal, wave and tidal energies. Alain Clément and Philippe Marchand bring to this issue several specific insights through their projects of new energy shorelines structured by technical horizons.

Keywords: history, marine renewable energies, testimonials, research and development, innovation, France.

* Centre François Viète d'épistémologie et d'histoire des sciences et des techniques (EA 1161), Université de Nantes.

J'AI RÉUNI, dans les pages qui suivent, les témoignages de deux ingénieurs français de la même génération impliqués dès les années 1970 dans la recherche sur les énergies marines¹. Ils partagent une même vision de « pionniers » des énergies marines en France et un projet similaire de constitution de nouveaux rivages énergétiques structurés par des horizons techniciens. Alain Clément est entré en 1976 comme chercheur au Laboratoire d'hydrodynamique navale (LHN) de l'École nationale supérieure de mécanique (ENSM) de Nantes². Il s'est impliqué, parfois contre vents et marées, pour la recherche et le développement de techniques d'utilisation de l'énergie des vagues. Philippe Marchand a, quant à lui, effectué son parcours au Centre national pour l'exploitation des océans (CNEXO)³ à Brest puis à Paris. De 1978 à 1986, il a, entre autres, dirigé un programme national « Énergies marines » portant sur les énergies maréthermique, houlomotrice et marémotrice.

Ces deux entretiens apportent aux concepts de rivage et d'horizon techniques développés dans ce numéro thématique quatre éclairages spécifiques. Premièrement, ils s'ancrent dans des réalités institutionnelles et thématiques contrastées : pour le premier, expérience nantaise dans une école d'ingénieurs, animée par le perfectionnement des machines houlomotrices ; pour le second, expérience au CNEXO, à Brest puis à Paris, plus focalisée sur l'énergie thermique des mers (ETM). Tous deux pourtant soulignent une même nécessité interdisciplinaire, un même souci de transfert de connaissances depuis le génie naval, l'informatique, l'océanographie, la robotique, etc. Deuxièmement, les deux entretiens suggèrent des formes possibles des rivages techniques pour l'exploitation des éner-

¹ Ces entretiens font partie d'archives orales que j'ai collectées durant ma thèse de doctorat intitulée *Histoire des énergies renouvelables en France, 1880-1990*, soutenue en septembre 2018 à l'université de Nantes.

² En 1986, le LHN prend le nom de Laboratoire de mécanique des fluides, puis, en 2012, de Laboratoire de recherche en hydrodynamique, énergétique et environnement atmosphérique (LHEEA). En 1991, l'ENSM devient l'École centrale de Nantes.

³ En 1984, le CNEXO fusionne avec l'Institut scientifique et technique des pêches maritimes (ISTPM) pour devenir l'Institut français de recherches pour l'exploitation de la mer (IFREMER).

gies des mers dont les modalités et les extensions varient de dispositifs quasi-terrestres, dits *onshore* (sur la rive), à des parcs éloignés de la côte, dits *offshore* (en dehors de la rive). Les rivages transforment ainsi des zones littorales en réservoirs de ressources énergétiques propulsées sur le marché mondial de la société industrielle. Troisièmement, les deux entretiens montrent la dimension internationale des projets technologiques qui se jouent aux quatre coins des mers du globe : Angleterre, Chine, États-Unis, France, Japon, Portugal, etc. Les espaces insulaires sont des terrains d'expérimentation privilégiés des énergies marines car coupés des réseaux électriques traditionnels : Açores, Cap-Vert, Hawaï, Nouvelle-Calédonie, Ouessant, Tahiti, etc. Enfin, quatrièmement, les deux entretiens attirent l'attention sur l'importance de facteurs d'ensemble qui échappent aux chercheurs de terrain : évolutions des contextes énergétiques comme les chocs et contre-chocs pétroliers des années 1970 et 1980 ; multiplicité des tendances politiques en fonction des époques, du nucléaire dans les années 1970 à l'écologie des années 2000. Ces forces puissantes, qui peuvent être subies autant que mises à profit sur le terrain, expliquent certains échecs dans le déploiement côtier de rivages énergétiques pour des raisons plus stratégiques que technologiques.

Entretien avec Alain Clément, École centrale de Nantes, 21 octobre 2015 et 2 novembre 2015 (extraits)⁴

- *Anaël Marrec : Merci d'avoir accepté cet entretien. Pourriez-vous commencer par me présenter votre parcours ?*

Alain Clément : Je suis à l'École centrale depuis 1972, date à laquelle j'ai intégré, en tant qu'étudiant, ce qui s'appelait l'École nationale supérieure de mécanique (ENSM), pour en sortir diplômé ingénieur en constructions navales en 1975. Puis j'ai fait une année de DEA [diplôme d'études approfondies] en 1975-1976, et j'ai continué sur une thèse de docteur-ingénieur. Tout ça, sans quitter l'ENSM, qui deviendra l'École centrale de Nantes en 1991. Tout ce parcours d'initiation à la recherche au sein du Laboratoire de mécanique des fluides, que j'ai fini par diriger

⁴ Les deux entretiens se sont déroulés dans le bureau d'Alain Clément au LHEEA. Ils ont duré respectivement 2h25 et 2h36. Les enregistrements audio ont été retranscrits de manière littérale. Les extraits sélectionnés ici ont été remaniés par Anaël Marrec et validés par Alain Clément.

de 2008 à 2012. Pendant ma carrière, je n'ai pratiquement pas bougé : ce n'est pas forcément un bon exemple mais c'est comme ça ! Pourquoi je suis arrivé là ? Si on revient dans les années 1970, comme beaucoup de mes collègues de ce laboratoire, j'étais passionné de voile : un « voileux » comme on dit. Si vous vous promenez dans les couloirs et que vous interrogez mes collègues, vous verrez que beaucoup ce sont des voileux et des surfeurs [Rires]. Il se trouve qu'à l'époque, quand j'étais en terminale, math sup-math spé, j'étais en même temps moniteur de voile et passionné par les bateaux, ce qui m'a donné l'envie d'associer mes pratiques d'ingénieur et de voile dans mon parcours. En France, il n'y avait que deux écoles qui permettaient d'être ingénieur en construction navale, c'était l'ENSTA à Paris, et l'ENSM à Nantes. J'ai passé les deux concours, et j'ai eu celui de Nantes, donc je suis venu à Nantes et je n'en suis jamais reparti. C'était ça au départ ma vocation : ce n'était pas l'énergie, c'était d'abord les bateaux et la mer. Pendant ma thèse, je n'ai pas travaillé sur l'énergie des vagues proprement dite, mais on commençait à en parler un petit peu : mon sujet consistait à développer des logiciels qui plus tard pourraient servir pour l'énergie des vagues. Pour tout ce qui flotte en fait : il y a des grosses intersections entre la science navale et les technologies de l'énergie des vagues.

Mon professeur s'appelait Pierre Guével, et il a marqué les énergies marines renouvelables en France. Pour le coup, c'est un pionnier des pionniers puisque, moi, qui me considère comme un pionnier, je n'étais que son étudiant. En fait on a découvert ça ensemble, à l'époque. Dès que j'ai été docteur, il m'a proposé de rester au labo — à l'époque l'université embauchait très facilement. Elle manquait de bras, enfin de bras diplômés, et c'était très facile de devenir chercheur ou enseignant-chercheur. Évidemment, c'est une autre paire de manches aujourd'hui ! Comme je m'étais vraiment passionné par la recherche pendant ma thèse, évidemment j'ai accepté. En 1979, on commençait tout juste à parler d'énergie des vagues. Tout de suite, on s'y est intéressé — on a commencé à élargir aux autres énergies marines depuis 2010 environ. Mais au début, fin 1970 début 1980, on ne s'occupait que d'énergie des vagues. Pourquoi ? Parce que notre cœur de sujet et de compétences, dans ce laboratoire, c'était le calcul du mouvement des navires sur les vagues. Or, pour n'importe quoi d'autre qu'un navire, ce sont les mêmes lois, les mêmes équations qui entrent en jeu, et par suite les mêmes logiciels de simulation. C'était le début de l'informatique, et on développait les premiers logiciels qui permettaient

de prévoir les mouvements d'un navire sur les vagues. Ils s'appliquaient, sans rien changer, à cette famille de machines houlomotrices dont le principe consiste à exploiter le mouvement d'un flotteur. Tout de suite, l'idée nous a plu. Nos premières motivations étaient plus les perspectives d'un nouveau champ d'application pour nos savoir-faire, qui, à l'origine, ne concernaient pas l'énergie, mais le génie naval. Ça a été une curiosité. Une chose importante dans l'histoire de l'énergie des vagues est la renaissance, disons moderne, de ce sujet, à partir d'un papier du professeur Stephen Salter, de l'Université d'Édimbourg, dans *Nature*, en 1974⁵. À l'époque, très peu de personnes se penchaient sur les possibilités d'exploiter l'énergie des vagues. À la fin des années 1970, Pierre Guével, moi, et deux ou trois doctorants avons mis en place les premières applications, qui sortaient de nos petites têtes. Tout jeune chercheur, j'ai notamment co-encadré, avec le professeur Guével, un doctorant qui venait de Grèce, de l'Université nationale d'Athènes : le premier doctorant à se consacrer à l'énergie des vagues. C'était aussi mon premier étudiant, et il était très enthousiaste. Comme il avait une bourse doctorale de son pays, son travail ne nous a donc rien coûté, et on n'a pas été contraints de rechercher des fonds pour son soutien. C'était une sorte de don du ciel : il avait son propre support, et ne demandait qu'à être accueilli et encadré. Ça a été un peu le début de toute cette histoire, les premières publications avec ce doctorant. Et voilà, le sujet était lancé au laboratoire, en tant que thème de recherche à part entière, dès 1980.

Alors, il y a eu des fluctuations entre cette époque-là et maintenant. Au début, comme c'était un thème intéressant mais nouveau pour moi, j'ai assisté à des congrès internationaux. Je me rappelle de mon premier congrès international, en 1979, à Göteborg, spécifiquement sur l'énergie des vagues. Au tournant des années 1980, il en y a eu plusieurs, qui réunissaient déjà des gens d'un peu partout. À l'époque, les Japonais étaient très actifs, ainsi que les Norvégiens, dans une moindre mesure. Tout cela a changé, aujourd'hui. Mais pendant vingt ans, les Anglais ont pris la tête de toutes ces recherches en termes de nombre de chercheurs, de doctorants et de projets. Aujourd'hui, les États-Unis, qui avaient délaissé le sujet jusqu'à une période située, disons, entre 2005 et 2010, sont entrés dans la course, « à l'Américaine », motivés, donc, par le business, ou

⁵ SALTER Steven (1974), « Wave power », *Nature*, vol. 249, n° 5459, juin, p. 720–724.

par un potentiel de business. Le business de l'énergie des vagues n'est toujours pas établi : on en est encore à dépenser beaucoup plus d'argent qu'à en gagner. En tout cas, dans les années 1980, les Américains étaient inexistants, ils n'étaient même pas sur la carte, alors qu'aujourd'hui, ils mettent beaucoup d'argent sur la table, y compris de l'argent public par le Department of Energy, pour faire avancer les recherches sur l'énergie des vagues — davantage que l'énergie des courants de marée par exemple, à l'inverse de l'Europe, et, plus particulièrement, de la France.

En France, il y a quelque chose qui est tout à fait spécifique. L'éclosion, au-delà du petit cercle des quelques chercheurs, des énergies marines a eu lieu autour de 2005. À ce moment-là, les acteurs du monde politique et industriel qui, par le haut, ont essayé d'organiser la recherche sur ces technologies et d'y mettre un peu de cohérence, ont inclus les éoliennes *offshore* dans le paquet « énergies marines ». Selon moi, et d'autres pensent comme moi, ce choix a été une espèce de killer pour l'énergie des vagues. Puisqu'on a créé et mis dans le même sac les énergies marines et l'éolien *offshore*, dans les mêmes commissions de lobbying, par exemple au Syndicat des énergies renouvelables, à Paris, et dans un certain nombre d'instances de décision nationales. Dans le même cadre, on a établi des feuilles de route pour des technologies absolument pas matures et au stade de la recherche, comme l'énergie des vagues et l'énergie des courants, et en même temps pour des énergies renouvelables matures, où les technologies existent déjà et où il existe un marché dont l'unité se compte plutôt en milliard d'euros. Un journaliste italien a parlé de « cannibalisation » pour décrire ce phénomène, et j'ai beaucoup aimé cette image : il dit que l'énergie des vagues a ainsi été cannibalisée par l'éolien *offshore*.

- *Le Laboratoire de recherches en hydrodynamique, énergétique et environnement atmosphérique (LHEEA) a élargi son champ d'expertise aux éoliennes offshore. Pouvez-vous m'en dire plus ?*

Je dirais que cela s'est produit entre 2005 et 2010. Et on a commencé à être sollicités, aux alentours de 2010, pour l'énergie des courants océaniques — les machines qui s'appellent des « hydroliennes » — en particulier parce qu'on avait des installations expérimentales qui permettaient d'étudier ces machines. On a donc participé à une première série d'appels d'offre « Appel à manifestation d'intérêts » (AMI) de l'ADEME [Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie], autour de 2009. Certains lauréats de ces appels à projet « Énergie des courants » nous ont associés

à leurs travaux puisqu'ils avaient besoin d'utiliser nos installations. Je pense, là, à Alstom (devenu General Electric depuis), pour leur première turbine à courant. Après ils ont changé de technologie pour finalement abandonner totalement l'hydrolien, c'est toute une histoire ! À la même époque on a commencé à s'ouvrir à l'éolien *offshore*, car le besoin d'expertise en ingénierie navale n'est pas loin. Notamment dans le domaine des éoliennes *offshore* flottantes, puisqu'aujourd'hui, l'éolien *offshore* « posé » dispose de technologies déjà matures. Il y a des recherches d'améliorations incrémentales probablement, mais très peu dans notre champ de recherches primitif. Avec les éoliennes flottantes, on réintègre tout notre champ de compétences sur les objets qui flottent dans les vagues : les techniques d'amarrage, les mouvements et les efforts dans des tempêtes extrêmes, etc. On prépare d'ailleurs une expérience en vraie grandeur sur l'éolien flottant. On a un site marin d'expérimentation au large du Croisic qui s'appelle SEM-REV [Site d'essais en mer pour la récupération de l'énergie des vagues]⁶, qui permet justement de tester les derniers stades de développement technologique, au-delà des bassins qu'on a ici, pour lesquels on ne peut faire des essais que sur modèles réduits. Ce site marin nous permet de mesurer leurs mouvements, leur comportement à la mer, la physique de leur environnement en direct et à l'échelle 1/1.

- *Est-ce que l'écologie est quelque chose qui vous a motivé pour travailler sur ce sujet-là, ou est-ce que c'est venu se greffer à votre passion pour la mer ?*

Pas dès le début. En fait mes motivations personnelles ont fluctué. La prise de conscience de l'importance de l'effet de l'activité humaine sur l'atmosphère, le réchauffement climatique, n'est venu dans l'esprit du grand public — et j'appartiens au grand public ! — qu'assez récemment finalement. Au tout début, dans les années 1980, ce n'était pas dans l'actualité, donc je n'étais pas plus sensible que ça à ces arguments. Au début, j'étais vraiment plus passionné par l'idée de pouvoir capter l'énergie de la mer, et comment faire. Vraiment, ce côté inventeur. C'est un challenge, un challenge scientifique et technique, et j'étais excité par ça.

Je pense que ma conscience écologique a évolué à l'époque du trou dans la couche d'ozone. Je daterais à peu près à cette époque-là ma prise de conscience que l'humanité est en train de consommer et de gâcher

⁶ Site d'essais en mer.

de façon non durable, non soutenable, son propre support. Et après, on a commencé à parler du réchauffement climatique. Pendant toutes ces années j'ai vieilli bien sûr, et puis je suis devenu père, puis récemment grand-père. Quand j'étais jeune chercheur, dans les années 1980, on commençait à parler de la fonte de la banquise dans l'Arctique de façon anecdotique. Je me rappelle qu'on disait : « dans quelques générations, ou dans un siècle, la banquise pourrait disparaître ». On plaçait ça dans la nuit des temps : c'était loin, c'était hors de portée, conceptuellement. On n'avait absolument aucune idée de l'imminence. Et puis progressivement, les chercheurs, le GIEC [Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat], s'y sont intéressés de plus près. Au fur et à mesure qu'on étudie plus précisément ce phénomène, la date se rapproche. Au début, en suivant, comme tout le monde, le sujet dans la presse, je me disais « si ça se trouve, un jour, mes petits-enfants verront disparaître la banquise ». Plus tard je me suis dit la même chose mais pour mes enfants. Et récemment, je me suis aperçu que moi-même, très probablement, avant de mourir, je verrais disparaître la banquise arctique. Et vous, encore plus ! C'est par le fait d'avoir des enfants et des petits-enfants que je l'ai vraiment perçu, que ça m'a touché.

Disons que je me suis approprié quelque chose qui est en général abstrait. Ça a rendu ce problème personnel. On dit, vous savez bien : « On n'hérite pas la terre de nos parents, on l'emprunte à nos enfants ». Certains attribuent cette phrase, magnifique, à Saint-Exupéry. Ça résume exactement ce que je disais. Ma prise de conscience et mon engagement là-dedans sont devenus beaucoup plus forts. Parfois même, ça me met en colère. Et j'en arrive, dans ces fameuses réunions auxquelles je participe parfois, à me mettre en colère parce qu'on en arrive toujours à des discussions, avec beaucoup de guillemets, de « marchands de tapis », ou seuls priment les intérêts financiers. De temps en temps, j'ai envie de dire : « mais vous n'avez pas d'enfants ? Vous avez envie vraiment qu'ils crèvent la gueule ouverte ? Vous vous en fichez ? Vous voulez gagner un petit peu plus, là, dans les cinq ans à venir, pour que vos enfants crèvent la gueule ouverte ? Et vous acceptez ça, et on ne parle que de finance ? » C'est... C'est étonnant.

Évidemment, on a besoin de temps de développement. On a besoin de toutes les formes d'énergies renouvelables : l'humanité a besoin que sur chaque filière d'énergie renouvelable, on arrive à une technologie qui soit au point, qui soit viable et qu'on puisse développer. Alors évidemment,

bien que la ressource soit immense, on ne va pas sauver l'humanité avec l'énergie des vagues. Je ne suis pas idiot, je n'ai jamais prétendu cela. Et ni seulement le solaire. La solution finale sera mixte et variable selon les endroits, comme l'énergie naturelle est répartie un petit peu partout, sous diverses formes. Dans le Sahara, vous n'allez pas faire de l'énergie des vagues mais très probablement du solaire. . .

Mais à l'inverse, dans certains endroits, comme par exemple l'île d'Ouessant, puisque c'est d'actualité, ce serait stupide de ne pas disposer d'une machine qui utilise l'énergie du courant qui passe là, et qui est énorme! Et il y a des endroits où l'énergie qui est la plus pertinente localement, c'est les vagues, eh bien il faut que les gens qui habitent là disposent de leur technologie. Et cela indépendamment de ce que ça peut rapporter à court terme aux financiers qui, cependant, tiennent la décision de développer ou pas. Parce que les vagues, précisément, sont bien adaptées pour des tas de communautés insulaires. Certaines petites communautés ont une énergie incidente énorme et utilisent aujourd'hui un groupe électrogène : ils importent du diesel qui est extrait des sables du Sahara! C'est une stupidité absolue. Chaque filière, chaque source d'énergie renouvelable, doit trouver sa technologie mature pour l'exploiter là où elle se trouve. Pas mature en termes de marché : tout est extrêmement relatif en termes de coût, mais pour satisfaire les besoins locaux là où on est, là où on vit. Évidemment, on ne va pas faire des centrales nucléaires pour alimenter les îles Loyauté en Nouvelle-Calédonie!

- *Pourriez-vous me décrire la période de « creux » des années 1980-1990?*

Dans les années 1970, il y a eu deux chocs pétroliers coup sur coup. C'est à cette époque-là qu'est sorti le fameux papier de Steven Salter, c'était le premier choc pétrolier, 74. Ça a induit un boom de l'intérêt pour les énergies renouvelables. Depuis, il y a eu un contre-choc pétrolier, au milieu des années 1980, et les rares sources de financement disponibles pour l'énergie des vagues se sont taries. Au LHN, on travaillait sur l'énergie des vagues grâce à des petits contrats souvent liés à nos installations expérimentales uniques en France. On était aussi soutenus par des fonds (publics) du CNEXO, qui aussi avait décidé d'essayer de faire avancer ce sujet, à la suite des premiers chocs pétroliers. Mais suite au contre-choc pétrolier qui a vu s'effondrer les cours du pétrole, le CNEXO a stoppé ses financements : cette ligne thématique a été fermée carrément.

Pierre Guével est parti de l'université pour travailler en entreprise. Et donc, au labo, je suis resté un peu seul à m'occuper du sujet, et sans financement. J'ai alors trouvé des biais pour continuer à travailler là-dessus mais en le présentant autrement. En particulier, j'ai travaillé sur les absorbeurs de vagues : dans certains ports, on cherchait à absorber les vagues pour ne pas gêner les navires, alors on a imaginé des systèmes actifs qui absorbent les vagues. En fait, ces systèmes récupèrent de l'énergie puisqu'ils absorbent les vagues : les vagues portent de l'énergie, donc si on affaiblit les vagues, nécessairement quelque part on a absorbé de l'énergie. Tant qu'on ne dit pas ce qu'on en a fait, on peut dire : « ah, j'ai absorbé les vagues ». Les bateaux dans le port ne vont pas bouger et les émirs seront très contents, puisque leurs yachts ne vont pas bouger. De cette façon, on trouvait des moyens de continuer à travailler en fait les mêmes choses, parce que dès qu'on écrit les équations et qu'on arrive au niveau théorique, on se confronte aux mêmes phénomènes et aux mêmes lois, comme au niveau de la modélisation numérique.

Ici au laboratoire, on fait de la modélisation numérique pour faire avancer les techniques, et la modélisation numérique de ces phénomènes n'existe pas « sur étagère » comme on dit. Il n'y a pas un grand logiciel qu'on achèterait : le logiciel, il faut se le faire soi-même, ce qui est justement une spécialité de notre labo. J'ai ainsi encadré plusieurs doctorants sur ce sujet, à la suite. J'arrivais quand même à avoir des doctorants sur des bourses d'État, qui étaient, disons, découplées d'une activité d'application industrielle précise. J'ai eu comme ça plusieurs doctorants qui étaient payés par le Ministère, ce qui m'a permis de traverser cette époque de vache maigre sur les énergies marines renouvelables. Alors, là, c'est vraiment une époque où les énergies marines renouvelables, on n'était peut-être pas cinq en France à savoir que ça existait en tant que sujet de recherche. J'avais quelques collègues à Grenoble, dans un labo du CNRS qui s'appelait le LEGI [Laboratoire des écoulements géophysiques et industriels], qui s'y intéressaient aussi un petit peu, parce qu'à Grenoble, il y a traditionnellement une école scientifique, une « chapelle » historique dans le domaine de recherche sur l'hydraulique. Mais c'est à peu près tout.

Depuis 1979, j'ai assisté, je ne dirais pas à tous les congrès, mais à presque tous, sur les énergies marines renouvelables, dans le monde. Jusqu'aux années 2000, pratiquement, dans ces congrès scientifiques où il y avait plusieurs centaines de personnes, j'étais le seul français ! Pendant ces années, on a aussi fait quelques expériences, avec les petits moyens

que j'avais. Mais les recherches expérimentales sur le sujet coûtent cher. Cela nécessite de construire des maquettes instrumentées, d'opérer, faire tourner nos installations expérimentales, nos bassins. Aujourd'hui, on est à plusieurs milliers d'euros la journée entre les coûts matériels et les dépenses de personnel nécessaire. Mais j'ai toujours eu entre un et trois doctorants qui travaillaient avec moi.

• *Que s'est-il passé dans les années 2000?*

Je ne sais plus quel était le déclencheur. En assistant à tous ces congrès, physiquement, j'étais en contact avec la communauté internationale qui travaille sur l'énergie houlomotrice. Je voyais des tas de projets très divers, c'était très foisonnant, avec des tas de systèmes dans tous les sens. J'ai participé, par exemple, avec des collègues portugais de l'IST [Instituto Superior Technico] de Lisbonne, à un projet de développement d'une centrale à énergie des vagues sur l'île de Pico, aux Açores — les Açores étant un territoire portugais, en plein milieu de l'Atlantique. À la fin des années 1990, ils ont construit une centrale prototype de démonstration, sur l'île de Pico. Eux étaient des grands spécialistes des turbines qui sont utilisées dans ce contexte, mais pas vraiment de modélisation numérique en hydrodynamique, c'est donc là que j'ai apporté mon concours. Par exemple, on a travaillé en cotutelle avec deux doctorants dans ce début des années 2000. Les chercheurs de l'IST sont devenus des grands amis depuis. J'ai aussi été sollicité dans d'autres projets, par exemple un projet hollandais qui nécessitait aussi des calculs pour une machine à énergie des vagues. Tout ça, c'était fin 1990 début 2000, et puis est venu un jour dans ce fameux creux où je prenais des doctorants sur un sujet annexe, connexe. En fait — il y a un mot clef là-dedans, que j'ai pas encore prononcé — j'ai travaillé sur le contrôle, le contrôle des engins qui absorbent les vagues. Comment manœuvrer un engin qui normalement génère des vagues, pour que, à l'inverse, il les récupère. Plusieurs de mes doctorants ont travaillé là-dessus, c'était assez en pointe au niveau international. Donc, j'avais aussi cette spécialité : d'abord, la modélisation numérique, puis le contrôle des houlomoteurs.

Voilà comment ça a rebondi, c'est important en terme conjoncturel : en 2002, le CNRS a passé un accord avec la région des Pays de la Loire pour favoriser l'innovation. C'était la première région, en France, qui signait un tel accord. Il permettait d'affirmer : « en région Pays de la Loire, on voudrait favoriser l'innovation. On a besoin de chercheurs qui

nous amènent des idées, et la Région va les aider ». À l'École centrale, il y avait un collègue que je connaissais très bien, d'un autre labo, directeur de recherches au CNRS, qui était parmi les négociateurs. Une fois que cet accord a été signé, il a fallu y intégrer des projets. Ce collègue travaille justement dans un labo de contrôle, également à l'École centrale, qui s'appelle l'IRCCyN [Institut de recherche en communications et cybernétiques de Nantes]. On avait déjà travaillé ensemble, je l'avais sollicité quand je travaillais sur le contrôle des absorbeurs de vagues. Aussi, il connaissait mes problématiques, mais de loin, puisque lui s'occupe d'un tas d'autres problèmes. Un jour, on se rencontre et il me dit : « dis-donc, t'aurais pas des projets sur l'énergie des vagues, tout ça c'est vachement intéressant, et c'est innovant ». Parce qu'on n'en parlait pas du tout en France. En plus, le contexte industriel local de la Basse-Loire est tout à fait approprié à développer ces technologies : comme il s'agit de grosses machines qu'on met en mer, il fallait solliciter la construction navale. Ce n'est pas innocent : la raison pour laquelle la filière se développe à Nantes, c'est que le tissu industriel local est tout à fait approprié à construire ce type de machine.

J'avais alors deux doctorants sur le sujet. On a fait un brainstorming, et puis on s'est demandé quelle serait la meilleure machine, la machine idéale, en tout cas dont on rêverait, pour récupérer l'énergie des vagues en fonction de tout ce qu'on savait du sujet, et des projets existants. Je vous le résume : ça ne s'est pas fait en une après-midi ! J'avais beaucoup travaillé, avec mes doctorants, sur des concepts étrangers, ou en collaboration, mais on n'avait jamais défini notre propre machine, notre propre concept. On a réfléchi, fait quelques allers-retours, et il en est sorti la machine que j'ai appelée SEAREV. Ça veut dire « Système électrique autonome de récupération d'énergie des vagues ». On a réuni ce qu'on pensait être le plus intelligent, le plus pertinent : une machine qui aurait un certain nombre de qualités, et en particulier le contrôle, sur lequel on avait beaucoup travaillé. Dans l'appel à projets CNRS-Région, on a proposé de faire des premières études de modélisation numérique, mais aussi une modélisation physique, en bassin : une maquette incorporant tout le système de production d'énergie. C'est un brevet du CNRS que j'ai déposé pour la France en 2004 puis étendu en 2005 à l'international. On en a pris un deuxième en 2008 et 2009 : on a introduit une amélioration dans le concept du contrôle.

À partir de là se sont succédé des subventions : on en a eu de l'ADEME, on en a eu de l'Europe également. Au fur et à mesure, ça a pris de l'importance, et puis l'IRCCyN s'est associé au SATIE [Systèmes et applications des techniques de l'information et de l'énergie], un laboratoire de l'ENS Cachan, à côté de Rennes, sur le site de Bruz. C'est aussi une UMR [Unité mixte de recherche] du CNRS, spécialisée dans les machines électriques non standard. Ils disent eux-mêmes qu'ils sont des mécatroniciens, qu'ils font de la « mécatronique ». Pour décrire en deux mots le champ de leurs travaux, c'est les machines électriques un peu « mouton à cinq pattes ». Ils ont travaillé, par exemple, sur la production d'énergie à partir des mouvements humains. Typiquement, les chaussures qui fabriquent de l'énergie quand on marche. Ils ont aussi travaillé sur le stockage inertiel d'énergie, par des volants d'inertie. On peut stocker l'électricité autrement que dans des batteries ou que d'une façon électrochimique, et en particulier en alimentant des gyroscopes électriques. Ce sont des silos avec des disques qui tournent très, très vite, et qui permettent d'accumuler mécaniquement de l'énergie cinétique. À l'époque, ces gens ne connaissaient rien à l'énergie des vagues, et ils se sont intéressés à SEAREV, parce qu'ils ont trouvé qu'il y avait un challenge, dans le développement d'une génératrice spécifique pour récupérer directement l'énergie. À partir de 2004, il y a eu, chez eux, trois doctorats, non pas sur SEAREV (parce qu'ils ne connaissent rien à l'hydrodynamique) mais sur la partie électrique de la machine. Déjà, ça fait du boulot.

En 2007, jusqu'à début 2009, j'ai réussi à intéresser des industriels. On avait fait des essais en bassin, grâce à ce financement dont je vous parlais, avec une maquette au douzième, donc une maquette qui fait déjà trois mètres sur deux (un gros flotteur), dans nos bassins. Mais pour aller plus loin, il fallait commencer à intéresser des industriels. J'ai réussi à intéresser un petit industriel français qui s'appelle AREVA [Rires]. Là j'étais assez fier de mon coup je dois dire. C'était en 2007. AREVA s'est entouré de quelques autres industriels, de la construction métallique et des opérations *offshore*. Il y avait une filiale de SAIPEM, un des plus gros opérateurs de logistique *offshore* mondial, qui antérieurement s'appelait Bouygues *offshore* et qui a été racheté par ENI (l'équivalent de Total en Italie). C'était la branche française d'un géant mondial. Mais il y avait aussi un constructeur local nantais, basé à Chantenay, et intégré dans le projet avant AREVA : Leroux et Lotz Technology, un gros « chaudronnier ». Ils construisent des grands ensembles métalliques relatifs à l'énergie et

fabriquent par exemple des chaudières pour les usines d'incinération qui font jusqu'à cinq étages de haut. Chez ces locaux nantais, il y avait un ingénieur qui sortait de Centrale, un ancien élève du labo qui a proposé de travailler avec nous. Ils nous ont aidés un petit peu, entre guillemets gratuitement, au début, avec échanges de bons procédés.

C'était une époque où j'avais beaucoup d'espoir [Rire]! Je me suis dit : « c'est bon maintenant pour le projet SEAREV, des industriels s'en occupent, tout va bien se passer ». Début 2008, je suis devenu directeur du labo, donc je me suis écarté du projet, rassuré sur son développement. Sauf que, en 2009, ils nous ont dit : « on arrête, on ne va pas réussir à atteindre un prix de kWh qui soit raisonnable, à tel horizon ». Là, ce n'est pas l'éolien, mais le nucléaire qui a tué le projet. Quelle était la sincérité d'AREVA dans cette histoire? On peut fantasmer, on peut être parano ou pas, moi je suis passé par toutes les étapes. Aujourd'hui, je commence à l'être moins, mais c'est sûr que j'ai eu beaucoup de mal à m'en remettre. D'autant plus qu'en 2009, l'ADEME avait lancé un appel à projets national pour financer des prototypes de machines houlomotrices! Ce qui était une première en France. L'État était prêt à mettre quelques millions d'euros, pour passer à l'étape d'après, amener les machines à la mer. Il n'y avait rien à faire, pour candidater et obtenir ce financement public. Le dossier était prêt, et c'est à ce moment-là qu'AREVA dit : « On arrête, ça ne nous intéresse pas ». Et il était trop tard. De plus j'étais directeur du labo à cette époque, je ne pouvais pas non plus tout plaquer pour reprendre le bébé! À titre personnel, j'étais coincé. Mes jeunes collègues qui m'avaient soutenu au début étaient déjà partis sur autre chose, évidemment, ils n'ont pas passé leur vie sur SEAREV. Il y avait une date de dépôt des dossiers AMI de quelques mois, et je n'avais absolument pas le temps de remonter quoi que ce soit.

L'histoire ne s'arrête pas là. Trois ans plus tard, j'ai fini ma direction de labo en 2012, et en 2013, il y a eu un deuxième appel à projet AMI de l'ADEME, dans lequel les machines houlomotrices étaient à nouveau éligibles. Là, je l'ai su suffisamment en avance, et pour monter un dossier j'ai créé une entreprise en 2013, qui s'appelait *OceanSwing*, avec trois jeunes centraliens qui voulaient avoir une première expérience de start-up. On a eu six mois pour monter un dossier en allant récupérer tout ce qu'on pouvait dans le passé du projet. Moi, j'y ai contribué comme j'ai pu, mais évidemment il y avait beaucoup plus de boulot que pour une personne. Les jeunes au départ ne connaissaient rien à l'énergie des vagues, au milieu,

aux problèmes, au contexte, au domaine. Ils ont fait ce qu'ils ont pu, et on a déposé le dossier à temps. Le dossier a été refusé, sur des critères financiers essentiellement. Nous n'avions pas de garanties suffisantes.

Depuis les financements originels dont je vous ai parlé précédemment, en 2009, sont intervenus les fameux investissements d'avenir. Ça avait été lancé par Sarkozy, et puis ça a été repris après sous Hollande. Là, c'est l'État qui investit pour faire avancer certaines technologies en mettant tant de milliards pour pousser certains secteurs industriels. Alors qu'avant, on avait plutôt de la subvention pure, maintenant, l'État se comporte en investisseur, pratiquement comme un privé, c'est-à-dire qu'il choisit d'investir dans des dossiers dont il voit une rentabilité à dix ans ou quinze ans. Il cherche donc à minimiser le risque dans le choix des projets alors que l'aide publique devrait servir justement à pousser les projets trop risqués pour être soutenus entièrement par des fonds privés ! De plus, l'État ne finance, en gros, que 50 % des projets. Mes jeunes collègues et moi-même n'avions pas dans les poches de quoi mettre la moitié d'un projet à quinze millions d'euros, évidemment. On avait bien rassemblé un consortium d'industriels, mais on avait principalement des lettres d'intention, pas d'engagement ferme avec un compte en banque et l'engagement financier suffisant pour que l'ADEME fasse rentrer le dossier dans la seconde phase d'expertise technique.

Depuis, j'ai arrêté de porter de tels projets. Il n'y a pas que la finance, c'est un travail de vie ! Vu la façon dont les choses se sont passées, je pense qu'il faudrait trop d'énergie personnelle. Vous savez, SEAREV, ça fait quand-même dix-onze ans ! Avec des hauts et des bas, des périodes d'espoir. Déjà AREVA, ça m'avait coupé les pattes, donc là, deuxième tentative, boum... De toute façon, oui, je continue à travailler avec les doctorants sur des aspects théoriques, ou numériques, pour l'énergie des vagues, pour faire progresser le savoir et les méthodologies dans ce domaine. Et je vous dis, il y a encore beaucoup de travail pour beaucoup d'années, pour beaucoup de gens, donc pas de soucis. Mais c'est dommage que cette aventure n'ait pas pu être menée au bout, parce que sur une carrière comme ça, c'est sûr que quand on va jusqu'à décrire une technologie, on aimerait la voir marcher ! Toucher l'océan, la mettre dans l'eau, et aller mesurer les kWh.

Alors, ce qui est drôle, c'est que, quand-même, pendant toutes ces années du projet SEAREV, on a fait pas mal de publi ! Il y a eu des thèses, des publications. Du coup, ça a été connu à l'étranger, à droite à gauche.

Et aujourd'hui, je vois, dans la littérature étrangère, des tas de petits SEAREV ! Des SEAREV chinois, des SEAREV américains, des SEAREV anglais... J'ai même vu, pendant, ce congrès, une équipe iranienne de l'université de Téhéran. Je ne savais même pas qu'il y avait les vagues par là ! Il décrit dans un papier un flotteur, avec un pendule dedans. Si vous tapez "SEAREV" sur Youtube, vous allez récupérer des tas de trucs. Des étudiants, dans des universités, qui font des petites expé en bricolant, avec leurs bassins, leurs machines. Ce que je dis souvent, un peu pour clore ces interrogations c'est : il y aura peut-être un SEAREV un jour, quelque part à la surface du globe, mais aujourd'hui, je pense qu'il y a beaucoup plus de chances pour qu'il y ait un SEAREV chinois plutôt qu'un SEAREV français. Puisque les Chinois n'ont absolument pas le même genre d'approche et de raisonnement que les Français. Il y a quelques Chinois qui travaillent sur l'énergie des vagues, j'en connais quelques-uns, et ils ont une approche beaucoup plus pragmatique. Ils ne commencent pas par s'intéresser au business, ils commencent déjà par essayer de comprendre comment ça marche, de mettre au point quelque chose qui marche (souvent en copiant les systèmes occidentaux suffisamment documentés). Il suffit que ça leur plaise, et ils sont capables d'en construire un ou deux à pleine échelle. On voit des choses comme ça dans les congrès !

- *Comment avez-vous articulé vos connaissances en hydrodynamique avec la mise au point de machines houlomotrices ?*

De manière globale, voilà une généralité pour l'énergie : c'est forcément interdisciplinaire, puisque l'énergie, on ne la crée pas, on la déplace, simplement. Avec l'énergie, on passe toujours d'un monde physique à un autre, et ça, c'est très intéressant. Ça a été très riche, ça m'a permis de découvrir des tas de choses, et de faire découvrir l'hydrodynamique à des gens.

Il y a, disons, au moins trois familles de houlomoteurs, trois principes de dispositifs physiques pour récupérer l'énergie des vagues. Dans toute cette histoire, j'ai voyagé, si on peut dire, à travers ces différents dispositifs. Au tout début, on a commencé à travailler, avec Michaël Spiridakis⁷, sur ce qu'on appelle des systèmes à déferlement. On imagine qu'on est par exemple sur une plage ou un littoral, et les vagues arrivent régulièrement, à un endroit qui est supposé être bien exposé aux vagues.

⁷ Site d'essais en mer.

Ce sont des systèmes qui sont comme on dit *onshore*, c'est-à-dire, en fait, qu'ils sont construits sur la terre, avec les pieds dans la mer. Il s'agit de plages artificielles, un plan incliné si vous voulez, exposé aux vagues, qui serait en béton ; comme une digue, mais dont la face exposée aux vagues serait un plan incliné, et en haut de ce plan incliné, il y a un seuil, et au-delà de ce seuil, un bassin, qui est un peu en hauteur par rapport à la mer. Les vagues arrivent du large, et avec un effet d'amointrissement de la profondeur, elles gonflent et viennent déferler au pied de cette rampe de déferlement. L'eau franchit le seuil en haut du plan incliné, et remplit un bassin qui est derrière : le réservoir. Ce réservoir se remplit donc vague après vague par bouffées. Le réservoir est situé en hauteur, alors quand je dis en hauteur, c'est à quelques mètres (cinq à dix mètres). Les Norvégiens avaient imaginé des systèmes à des dizaines de mètres, c'est peut-être un peu gourmand. Ce réservoir possède une ou plusieurs turbines dans une tuyauterie qui permet à l'eau de retourner à la mer. L'eau est stockée en hauteur, on récupère cette énergie potentielle, en laissant l'eau du réservoir retourner à la mer, à travers ces turbines. Ça revient à utiliser des turbines qu'on appelle, en hydraulique, des turbines basse chute. C'est ce qu'on utilise aussi pour faire de l'électricité au fil de l'eau, comme on dit, sur les fleuves, où on peut avoir des retenues avec quelques mètres de dénivelé. Les briques technologiques existent, ces turbines en particulier, et donc là, l'idée c'était de les appliquer à l'énergie des vagues.

L'objet de la thèse de Michaël Spiridakis était d'améliorer ce concept primaire que je viens de décrire en munissant cette rampe de dièdres convergents de façon à ce que, quand l'eau monte sur la rampe, elle monte encore plus haut et de cette façon améliore le rendement des turbines. À l'époque on a constaté, validé, et publié l'efficacité du concept. C'est une de mes premières publications dans le domaine des énergies marines. Il faut bien noter qu'on était encore dans l'époque faste de découverte des énergies marines où on avait des financements pour les étudier. Comme on était au tout début du développement, des financements modestes étaient suffisants. Spiridakis est venu pratiquement avec son sujet : il avait un peu de *background* sur l'hydrodynamique des vagues, mais aussi un diplôme de génie civil. Or ces systèmes-là, ça s'assimile à ce qu'on appelle, selon un terme général en France, « travaux maritimes ». Spiridakis, était ingénieur civil de l'université d'Athènes. Venant de Grèce, il était plutôt porté sur la construction des marinas et des ports. Nous, avec nos outils locaux, on avait des moyens d'aborder le sujet. Cette histoire

prouve la richesse de la recherche et le fait que tout travail sur l'énergie est toujours interdisciplinaire. Ce premier travail a été principalement expérimental. On a utilisé nos bassins munis de générateurs de vagues. C'est une constante du laboratoire depuis sa création, à cette époque-là et encore aujourd'hui, c'est qu'on a toujours une démarche parallèle théorie-modélisation, et expérience. Et on fait toujours la validation croisée des deux approches, sans arrêt.

Sur les systèmes à déferlement, on était très, très enthousiastes les uns et les autres, parce que c'était quelque chose de nouveau, on était un peu pionniers, et puis on commençait à avoir des premiers résultats. Pour le jeune chercheur que j'étais à l'époque, c'était très stimulant. C'est un constat qui se généralise, en recherche : lorsque c'est un champ nouveau, on avance assez vite, c'est valorisant, c'est forcément plaisant pour le chercheur. On n'est pas très nombreux, on n'a pas trop de concurrence. On était soutenus par le CNEXO qui, dans ces années 1980-1985, avait une petite équipe sur les énergies marines et était intéressé par ce sujet, et qui avait envoyé un ingénieur de recherche en Nouvelle-Calédonie pour trouver un site d'application de notre système, en vraie grandeur. Ce système était bien adapté à des sites insulaires qui n'ont pas d'accès à l'électricité autrement. Évidemment, ce n'est pas très performant économiquement si vous mettez ça à Saint-Nazaire où, c'est sûr, il y a d'autres façons d'avoir de l'électricité. Gilbert Damy du CNEXO avait trouvé un site sur l'île de Maré, sur les îles Loyauté, à côté de la Grande Terre. À l'époque, c'étaient principalement des tribus indigènes kanakes qui vivaient là-bas. L'électricité se présentait dans des conditions tout à fait exotiques. Or, ce sont des îlots qui sont très bien exposés aux vagues, en particulier aux vagues australes qui viennent du Pacifique Sud. C'est aussi l'époque où une tribu s'est rebellée contre l'autorité française. Il y a eu des morts des deux côtés, des gendarmes français et des kanaks. Des affrontements terribles ont eu lieu, et c'est ce qui a déclenché une réflexion du gouvernement français sur le statut de la Nouvelle-Calédonie.

Alors un horizon a été fixé : ils se sont donné une grande période de temps pour voir si la Nouvelle-Calédonie évoluait vers une indépendance, et dans le cadre de cette évolution, quelle serait la place des tribus autochtones et indigènes par rapport aux « blancs » (qu'on appelle là-bas des « caldoches »). Il y avait toute une problématique de décolonisation. C'était donc un endroit des DOM-TOM où on pouvait tout de suite voir l'intérêt de ces systèmes houlomoteurs, parce que ce sont des endroits où

on ne va pas raisonner en termes de coût du kWh. Jamais, à cet endroit, il n'y aura d'électricité d'origine nucléaire! Il y a quelques groupes électrogènes, il faut amener l'essence ou le fioul par bateau dans des fûts, enfin c'est une horreur. Ils ont commencé à avoir un peu de solaire. De l'éolien, certainement pas, puisque ce sont des terres où ils y a des cyclones à peu près une fois par an, alors si vous mettez des éoliennes, une fois par an, elles sont par terre — bien qu'il y ait des modèles d'éoliennes plus ou moins escamotables. En tout cas, ce n'est pas l'idéal pour faire de l'éolien. Alors qu'il y a l'énergie des vagues qui arrive depuis la nuit des temps sur ces rivages et qu'il n'y a qu'à se servir! C'est typiquement un territoire où l'énergie des vagues est naturellement l'énergie renouvelable qu'il faudrait utiliser. Associée à des moyens de stockage de moyenne capacité, il y aurait largement de quoi alimenter toutes ces petites îles.

Ensuite j'ai rencontré au cours d'un congrès des collègues professeurs à l'Instituto Superior Technico de Lisbonne (IST Lisbonne). Une école d'ingénieurs généraliste, avec un labo où, comme ici, déjà, des gens se spécialisaient dans les énergies marines. Des pionniers mais portugais! Ils travaillaient sur des systèmes « à colonne d'eau oscillante ». Deuxième grande famille de systèmes : *Oscillating Water Column* (OWC). C'est là que notre *background* de thermodynamiciens plutôt calculateurs est mis à l'épreuve, puisque les personnes qui développaient ces systèmes n'avaient pas beaucoup d'outils logiciels pour en faire la simulation et la modélisation. C'est un des premiers cas où on est parti de la base des logiciels établis au laboratoire, dans le cadre du génie maritime. Il a fallu les customiser, disons, pour les appliquer aux systèmes à colonnes d'eau oscillantes. Ce projet a débouché sur une vraie construction, sur l'île de Pico, aux Açores. La centrale a été mise en service dans les années 2000. Notre équipe a participé en amont de la construction, dans les années 1990, en fournissant des calculs, des estimations. J'ai fait travailler des doctorants là-dessus. En particulier, j'ai eu au milieu des années 1990, une doctorante portugaise, Anna Brito e Melo qui était en thèse de cotutelle, entre l'IST Lisbonne et notre laboratoire. Mais cette deuxième famille de systèmes ne m'a jamais emballé en termes d'applications! J'ai toujours pensé que ce n'était pas très pertinent de mettre des systèmes en bord de mer, pour une raison (qui n'est pas forcément rédhibitoire) : il faut savoir que le niveau d'énergie des vagues se dégrade quand on passe du large vers la côte. Si on fait une courbe en fonction des distances, le niveau d'énergie décroît fortement sur les dernières centaines de mètres, et on perd plus

de la moitié de l'énergie. D'autre part, et il suffit de voir les photos de la centrale de Pico, c'est très très laid. En France par exemple, on ne pourrait pas construire une telle centrale. Même avec la meilleure volonté du monde, je peux vous dire que la loi littorale, en termes d'acceptabilité, c'est l'horreur. Or, ces machines ressemblent à un blockhaus en béton, si vous mettez ça sur une côte sauvage à Quiberon, vous imaginez ! Il va y avoir des résistances, c'est sûr ! Et je vous dis, en plus c'est moins pertinent, puisqu'il y a moins d'énergie au bord qu'au large. Et puis autre détail d'ordre technologique, c'est que le rendement de ces fameuses turbines à air qui fonctionnent dans les deux sens (aspiration/expiration) avec des courants d'air qui sont au final assez lents, à vrai dire, n'ont pas un très bon rendement. Les défenseurs de ces systèmes vous disent : « c'est miraculeux, il n'y a aucune pièce en mouvement, c'est juste l'eau qui bouge mais tout le reste est fixe, donc rien ne tombe en panne ». C'est vrai, mais on paye cette « élégance » technologique par 50 % de rendement, c'est-à-dire qu'on le paye avec la moitié du productible ! Donc, est-ce bien raisonnable ? Pour finir sur ces systèmes, des gens ont proposé de faire de telles stations, mais carrément flottantes, et qu'on emmène au large. Il y a des tas de projets de ce genre de centrale houlomotrice OWC *offshore*. Alors, pour le moment, aucune n'a été installée d'une façon permanente, et il y a eu, par contre, quelques naufrages de prototypes. Par exemple, le système qui s'appelait *Ospray* a coulé le jour de son lancement, et il y a eu d'autres échecs plus récents. Je pense à un système australien, qui s'appelait *OceanLinx*. Ça pourrait être un sujet de bouquin, d'écrire l'histoire de tous ces naufrages de systèmes houlomoteurs !

Donc pour moi, il vaut mieux mettre des systèmes flottants, les dernières générations qu'on va pouvoir installer plus au large, là où il y a plus d'énergie. Les systèmes à flotteurs font partie de la troisième grande famille de systèmes : les *wave activated bodies*, c'est-à-dire la famille qui utilise des corps mis en mouvement par les vagues. On a soit un flotteur, soit un système qui est mis en mouvement par les vagues. Parfois, il ne flotte pas, mais il est mis en mouvement par les vagues, comme un panneau qui serait articulé au fond, qu'on mettrait dans les vagues qui le font bouger, même s'il ne flotte pas. On récupère le mouvement pour faire de l'énergie. Alors, ça, c'était encore une fois bien adapté à ce qu'on savait faire. Par exemple, si vous prenez ce système-là, avec un flotteur que vous mettez dans les vagues, c'est comme un navire : les mêmes équations, les mêmes modèles. Sauf qu'au lieu de l'amarrer avec une chaîne, on l'amarre

par l'intermédiaire d'un système qui va récupérer de l'énergie, électrique éventuellement. Alors, il faut payer le prix de la connexion sous-marine, ce qui n'est pas gratuit, évidemment. Il faut trouver les bons compromis, et c'est là qu'intervient l'acceptabilité en termes d'intégration dans le paysage (ou plutôt de désintégration) [Rires]. Ça se paye, par exemple pour nous, en termes de kilomètres de câbles électriques sous-marins. À la louche, un kilomètre, ça doit être un demi-million d'euros. Donc quand on vous dit : « il faut les mettre un peu plus loin, pour qu'on les voit pas », d'accord, mais qui paye le fait qu'on les met un peu plus loin ? Ce n'est pas simple. Au moment où on n'avait plus de financements, j'ai travaillé avec Christophe Maisondieu, un doctorant qui a soutenu en 93, sur des systèmes destinés aux bassins à houle. Ils servent à faire des mesures sur des maquettes de systèmes *offshore*. On a un générateur de vagues, et à l'autre bout, classiquement, on a une plage artificielle sur laquelle on fait déferler les vagues. Le déferlement dissipe en fait presque toute l'énergie, comme ça se passe dans la nature. Ça fonctionne pas mal, mais ça prend beaucoup de place, et puis, c'est passif. On a travaillé sur un absorbeur de vagues dynamique qui n'est autre qu'un *anti-générateur* de vagues. Le problème qu'on s'est posé, c'est de déterminer, si on met un même système à l'autre bout ici, moyennant une vague qui arrive, quelle est la loi de vitesse du volet absorbeur qui annule les réflexions des vagues incidentes. On appelle ça un absorbeur dynamique de vagues, car il les absorbe par son mouvement. Avec deux doctorants consécutifs, on a donc affiché qu'on travaillait sur les absorbeurs de vagues, et sans le dire, on a travaillé sur la récupération de l'énergie des vagues. La modélisation de ces technologies nécessitait un important travail sur le contrôle, et c'est à ce moment qu'on a commencé à travailler avec nos collègues de l'IRCCyN. Dans les années 2000, à la faveur du concours CNRS-Région, on a commencé à vouloir concevoir notre propre technologie. On avait tout ce *background* de travail sur le contrôle des houlomoteurs quand on a conçu notre système SEAREV. On s'est aperçu que le fait d'incorporer la contrôlabilité du houlomoteur dans son design initial, directement au niveau du concept, ça donne un avantage au final sur sa production et donc sa viabilité en tant que produit.

- *Pourriez-vous m'en dire plus sur le site d'expérimentation du Croisic ?*

Avec le démarrage de SEAREV en 2003, des acteurs de la région se sont intéressés au projet, en comprenant que le développement de ces machines devait passer des essais à la mer. Or, on n'avait aucun site d'essai en mer dans la région, ni en France. Il y en avait un seul dans le monde, depuis les années 1990 : l'European Marine Energy Centre, tout au nord de l'Écosse, dans les îles Orcade. Sauf qu'il était d'un accès tout à fait délicat, et dans des coins mal adaptés pour des prototypes qui n'étaient pas au point. Il y avait aussi le côté : « les Anglais sont en avance, mais si on fait quelque chose, on peut peut-être le faire chez nous ». On a pu bénéficier d'un contrat de plan État-Région (CPER) 2006-2013, ces contrats pluriannuels que l'État et les Régions cofinancent pour développer des infrastructures. Là sur ce coup, j'étais un peu tout seul. J'ai fait, à partir de la page blanche, un dossier de financement pour le CPER, qui a eu le bonheur d'être accepté. Deux projets ont été retenus cette fois-là : SEM-REV et le cyclotron, au CHU pour accélérer les particules, en médecine nucléaire, autre projet emblématique. Je me suis entouré de jeunes collègues pour faire avancer ce dossier. Aujourd'hui, le site est opérationnel.

Pour la localisation au Croisic j'avais discuté avec le président du Conseil général de Loire-Atlantique de l'époque, et c'est lui qui avait détecté le lieu où on a pu s'installer : on est dans les bâtiments d'un grand parc public en bord de mer qui appartient au Conservatoire national du littoral. C'est un immense parc dans lequel il y avait une villa début xx^e et ses dépendances, vous voyez, comme on en voit à la Baule. Une magnifique villa face à la mer, au Croisic, avec un parc qui fait je ne sais pas combien d'hectares... Ce site était disponible puisqu'il n'était plus occupé par la mairie du Croisic, qui avait fait construire une mairie neuve ; donc tous les services municipaux qui avaient été logés dans cette villa ont été rapatriés dans la nouvelle mairie. Ça s'est trouvé à être vide et disponible juste à la bonne époque, et au Conseil général, Patrick Maréchal, qui était un peu tombé amoureux du projet, avait dégotté cette opportunité magnifique. Le bâtiment qu'on occupe aujourd'hui était presque en ruine ! Il a été entièrement retapé, mis aux normes, ils ont fait des bureaux, des ateliers où on prépare l'instrumentation sous-marine, les bouées de mesure, etc. On a fait construire le poste électrique un petit peu plus loin,

à quelques centaines de mètres, puisqu'on a un câble électrique de vingt-deux kilomètres qui va en mer, et qui est destiné à ramener l'électricité au réseau public ERDF [Électricité réseau distribution France]. Ça a été construit entre 2006 et 2013, c'est énorme ! Je ne me doutais pas au départ que ce serait aussi long, mais on peut dire que le site est opérationnel maintenant. Il a été pensé au départ pour les génératrices houlomotrices, ce qui veut dire qu'il est bien exposé aux vagues, et sur une profondeur d'eau suffisante, de l'ordre de trente-cinq mètres à basse mer. C'est aussi une bonne profondeur pour tous les systèmes d'énergies marines flottants, donc ça convient bien également pour des éoliennes flottantes.

Il se trouve qu'en ce moment il y a deux projets : un projet d'éolienne flottante qui est signé, et devrait être construit pour l'été prochain ; et puis, dans la région, il y a un projet houlomoteur de Geps Techno, qui va candidater pour être essayé sur ce site. Si on regarde par rapport à l'époque où on était pionnier, je pourrais dire « où j'étais pionnier », tellement on était peu nombreux, ce que sont devenues les énergies marines aujourd'hui dans la région des Pays de la Loire, c'est assez extraordinaire de constater le développement. Je pense que le site SEM-REV a été un support politique, en ce sens que très vite, j'ai réussi à sensibiliser les politiques régionaux là-dessus. L'argumentaire consistait à dire que si l'énergie des vagues se développe en France, une des meilleures régions pour le faire, c'est les Pays de la Loire, à cause du fait qu'on aura besoin des industries navales, si on monte en puissance, et qu'elles sont là, à Saint-Nazaire. Il y avait ça, et puis la proximité avec l'équipe de recherche ici, qui assure une espèce de continuité. Je n'ai pas fait ça tout seul, évidemment. C'était devenu un travail d'équipe, mais je pense que j'ai quand-même joué personnellement un rôle déterminant là-dedans, au moins au démarrage, et oui, ça j'en suis content ! Je serai complètement satisfait le jour où j'aurai vu les premières machines dessus, et les premiers kWh sur les compteurs. Mais bon, le site existe, le câble existe, la centrale électrique existe, on peut les toucher, tout ça, c'est prêt ! Et voilà ! J'aurai par contre toujours la déception de ne pas avoir réussi à emmener le projet de machine houlomotrice SEAREV jusqu'au bout. Mais je crois que j'ai bien contribué au développement de cette discipline, les énergies marines, au niveau national, et particulièrement, dans la Région.

Philippe Marchand, Guipavas, 26 février 2016 (extraits)⁸

- *Anaël Marrec : Merci d'avoir accepté cet entretien. Nous pouvons commencer par votre parcours dans le domaine des énergies marines au CNEXO.*

Philippe Marchand : Le CNEXO [Centre national pour l'exploitation des océans] a été créé le 3 janvier 1967, sous de Gaulle, en même temps que l'ANVAR [Agence nationale de valorisation de la recherche] et l'IRIA [Institut de recherche d'informatique et d'automatisme]. Alain Peyrefitte, ministre délégué chargé de la Recherche scientifique et des Questions atomiques et spatiales avait compris que la recherche océanographique était émietlée, réalisée par des universitaires tous aussi intelligents les uns que les autres mais disposant de peu de moyens. Le CNEXO avait vocation à s'occuper du champ immense de la recherche océanographique, dont les seuls domaines à être déjà couverts étaient la pêche et la conchyliculture par l'ISTPM [Institut scientifique et technique des pêches maritimes]. Sa première mission a été de se doter d'une flotte de grands navires de recherche. [...] Il fallait aussi coordonner les efforts des universitaires et leur donner de l'argent pour travailler. Le CNEXO a reçu et redistribué beaucoup d'argent, pour coordonner et stimuler la recherche océanographique « tous azimuts ». Alors évidemment, certains universitaires ont *grinché*, en disant : « Qu'est-ce que c'est que ces technocrates, ils nous embêtent, on veut continuer ce qu'on fait en toute indépendance ». Et finalement ils ont vu que le CNEXO avait raison, parce qu'il a constitué une grande flotte océanographique avec le Jean Charcot (lancé en 1965), le Noroît (en 1971), le Nadir (en 1974), le Suroît (en 1975), des navires capables de naviguer dans l'océan mondial. Deux thématiques dominaient dans le programme du CNEXO.

Premièrement, développer l'aquaculture en France, c'était la vision de Jacques Perrot qui croyait beaucoup dans le développement de l'aquaculture, qui allait « sauver le monde », d'une certaine façon ! Qui allait prendre le relais des pêches ! Il avait raison puisqu'aujourd'hui, cinquante ans plus tard, un poisson sur deux qu'on consomme est d'origine aquacole. Ces recherches ont été menées au CNEXO, à Brest.

⁸ L'entretien a duré 2h57. L'enregistrement audio a été retranscrit de manière littérale. Les extraits sélectionnés ici ont été remaniés par Anaël Marrec pour la présente publication et validés par Philippe Marchand.

Deuxièmement, développer l'exploitation des ressources minérales avec un ambitieux programme de recherche sur les nodules polymétalliques, qui se trouvent dans les grands fonds, entre 4 000 et 5 000 mètres. On peut parler d'un effort colossal de la France, un programme très visionnaire et coûteux, qui a mis en œuvre des bateaux capables d'aller naviguer dans le Pacifique, là où se trouvent les nodules polymétalliques les plus intéressants, entre Hawaï, la Polynésie et Clipperton. J'ai eu la chance de participer à deux « missions nodules » dans le Pacifique, c'était extraordinaire, on avait l'impression d'être des pionniers, des défricheurs d'océan !

Troisièmement, à côté de ces deux programmes, il y avait une ambition d'évaluer les énergies marines. J'ai eu la chance de participer au début de ces recherches. C'était moins prioritaire que l'aquaculture et les nodules, mais on a beaucoup travaillé.

On a travaillé d'abord dans l'accompagnement du programme électronucléaire sur le littoral français. Ça a été mon job quand j'ai été embauché au CNEXO en 75, car j'avais réalisé mon projet de fin d'études à l'ENSTA, en 1973, sous la direction d'EDF et du CNEXO sur un sujet ambitieux : l'étude d'une centrale nucléaire flottante dans le site de Flamanville. C'était le début du programme nucléaire français, on a beaucoup travaillé sur les études de site où allaient s'implanter ces centrales nucléaires le long du littoral. La première a été construite à Gravelines. Le CNEXO était chargé de faire un état des lieux avant que la centrale ne commence à fonctionner, puis d'en faire un suivi. En l'occurrence, c'est moi qui m'en suis occupé, de 1975 à 1977, au CNEXO de Brest. J'avais une petite équipe de biologistes, qui est allée périodiquement sur le terrain analyser la faune, la flore. Puis la centrale a été mise en route, et j'ai étudié, comme physicien, la tache thermique produite sur plusieurs kilomètres par l'eau de refroidissement et qui allait perturber le biotope. J'ai rencontré des physiciens d'EDF du laboratoire de Chatou, mais aussi, aux États-Unis, au MIT [Massachusetts Institute of Technology], le professeur Stoltenback, qui était le grand spécialiste des taches thermiques.

Et puis on a travaillé sur les énergies marines renouvelables. Après cette mission sur l'impact des centrales thermiques à Brest, je suis devenu chargé de mission auprès du directeur général, « adjoint opérations », de Claude Riffaud, à Paris, de 1977 à 1979, puis de 1979 à 1982, responsable d'un programme « Énergie thermique des mers » [ETM], au CNEXO à Paris. Ensuite, de 82 à 87, j'étais responsable des programmes « Éner-

gies marines renouvelables et technologies navales » à l'IFREMER Paris. En 1984, l'ISTPM et le CNEXO avaient en effet fusionné en un seul organisme, l'IFREMER. Le programme Énergies marines était basé au siège à Paris, et les équipes de techniciens et d'ingénieurs étaient à Brest, sous la direction de Michel Gauthier. C'était d'une certaine façon le bras technique du développement des énergies marines, notamment pour le projet de centrale ETM de 5 MW à Tahiti.

- *Pourriez-vous m'en dire plus sur ce projet de centrale ETM à Tahiti ?*

L'avant-projet de station ETM pilote à Tahiti a été le gros programme français dans les énergies marines jusqu'au milieu des années 1980. Cet article de Michel Gauthier constitue une bonne synthèse des travaux qui ont été faits⁹. Il y a deux problèmes principaux dans une centrale ETM, la tuyauterie d'eau froide et l'échangeur de chaleur. Au CNEXO, nous nous sommes chargés de l'étude des échangeurs en direct et de l'étude des conditions du site d'une manière très générale, y compris de la topographie. Pour ce qui est de l'échangeur, on a notamment expérimenté, pendant plusieurs années, une boucle d'essais sur le môle de Sainte Anne du Porzic (au pied de l'IFREMER-Brest) pour tester la tenue de différents tubes d'échangeurs aux biosalissures, qui est un problème clef de l'ETM en cycle fermé. Car il y a deux cycles thermodynamiques possibles, le cycle ouvert et le cycle fermé : le cycle ouvert vaporise directement sous vide l'eau chaude extraite de la surface des océans pour la détendre dans une turbine basse pression, tandis que le cycle fermé a recours à un fluide caloporteur intermédiaire, et nécessite un échangeur de chaleur entre l'eau chaude et ce fluide. Les biosalissures, on en trouve partout dans l'océan, qu'on soit à Tahiti ou qu'on soit ailleurs. On faisait circuler de l'eau de mer en continu dans les tubes d'échangeurs, et on observait le développement du « biofilm ». On a testé différents procédés pour le nettoyer, comme le système Taproge avec des petites boules en forme d'éponge, qui raclent la paroi intérieure des tubes, ou encore l'injection de produits chimiques comme le chlore. On a aussi effectué de nombreuses études de reconnaissance-terrain pour l'implantation de la centrale de Tahiti. Pour la tuyauterie d'eau froide, on a fait des campagnes de recon-

⁹ GAUTHIER Michel (2005), « Énergie thermique des mers, le programme français jusqu'au milieu des années 1980. Le projet ETM 5 MW Tahiti », *Rapport de recherches pour l'Ifremer*.

naissance du site de Papeete, là où devait être implantée la centrale, avec un navire américain équipé d'un *sea-beam*, premier sondeur multi-faisceaux de l'époque, qui nous a produit une cartographie des fonds sur les deux kilomètres qui nous intéressaient pour implanter la centrale.

Nous avons beaucoup travaillé avec les industriels, dans un consortium qui s'appelait Ergocéan, dans lequel il y avait du beau monde : Empain-Schneider, Alsthom Atlantique, Creusot-Loire (Framatome). Creusot-Loire qui fabriquait les échangeurs des centrales nucléaires françaises, a étudié les échangeurs du cycle fermé. Alsthom-Altantique a étudié le cycle ouvert, dit de Georges Claude, qu'ils ont expérimenté dans une boucle expérimentale à Grenoble dotée d'un bouilleur sous vide. Ils ont essayé de perfectionner le rendement thermique de l'échangeur. Pour la mise au point de la conduite d'eau froide, Spie Batignolles, leader des travaux maritimes, a travaillé avec la compagnie Doris, une société parapétrolière bien connue. SGE [Société générale d'entreprises], filiale de la CGE [Compagnie générale d'électricité], a travaillé sur l'ingénierie de la centrale. SGE abritait Ergocéan, le consortium industriel contracté par l'IFREMER. On a débouché rapidement sur un concept de tuyauterie assez original, qui consistait à survoler le fond pour éviter les risques de poinçonnement, avec une conduite en polyéthylène, dont on assurait la flottabilité avec tout un ensemble de flotteurs. Au CNEXO de Brest, on a modélisé, à échelle très réduite, la conduite d'eau froide dite en arche à flottabilité positive. Les matériaux de flottabilité étaient une des spécialités du CNEXO, ils équipaient nos deux sous-marins très performants (Cyana et Nautile). Une équipe d'une demi-douzaine de personnes a travaillé pendant sept-huit ans à l'IFREMER Brest sur cet avant-projet de centrale de Tahiti. Je pense qu'on avait un très bon concept, fruit de beaucoup d'études. Je suis convaincu par exemple que notre conception de conduite d'eau froide en arches survolant le fond était optimum pour une centrale terrestre.

Ce projet a connu son apogée avec l'étude d'avant-projet de la centrale ETM de Tahiti, de 1983 à 1987. Je dirais qu'au total, entre les études amont et d'ingénierie, on avait une dizaine de personnes qui étaient mobilisées à temps plein sur cette affaire ETM à Tahiti. Puis ce projet s'est arrêté brutalement, au moment de la division par trois du prix du baril de pétrole qui s'est produite en 87. On avait abouti à un avant-projet très détaillé, et je pense que si on nous avait donné le feu vert pour le financement en 86-87, sans le contre-choc pétrolier, on l'aurait construite,

cette centrale de 5MW! On aurait pu faire quelque chose d'absolument formidable. Le prix de revient du kWh de cette centrale (1,8 franc) n'était pas délirant par rapport au kWh produit par les groupes électrogènes diesel de Tahiti (1 franc). Pour un démonstrateur de 5MW net, c'était tout à fait valable. Parce que l'effet d'échelle en ETM est important : le prix de revient du kWh diminue assez fortement avec la puissance de la centrale. L'abandon de ce projet fut un coup dur pour les Tahitiens, qui en attendaient beaucoup. Ils avaient d'autres ressources d'énergie renouvelables, notamment les micro-centrales hydrauliques, parce qu'il y a beaucoup d'eau et de relief sur cette île. Alors ils ont implanté des micro-centrales de quelques centaines de kW, quelques MW au total. Mais le gouvernement de Tahiti a été très déçu de ne pas voir construire la première centrale ETM mondiale opérationnelle. C'eût été un événement technique colossal!

Après cet abandon, une mini-équipe composée de deux-trois personnes a continué à entretenir un peu la flamme pendant deux-trois ans, en se reconvertissant sur l'étude du dessalement de l'eau de mer par l'utilisation de l'ETM. Il y a eu un projet à Bora-Bora : il s'agissait de dessaler de l'eau en utilisant un tuyau pas trop coûteux, qui ne nécessiterait pas d'aller pomper de l'eau à 800 mètres de profondeur, où l'eau est à 5°C. En allant à 400 ou 500 mètres, l'eau est en dessous de 10°C. On a fait une étude de faisabilité. Mais finalement, les Américains ont repris le relais, et ils ont réalisé un système de conditionnement d'air d'un hôtel, par un procédé dit « SWAC » [Seawater Air Conditioning]. De l'eau froide est pompée à 300 ou 400 mètres de profondeur, et envoyée dans les radiateurs, ou plutôt dans des climatiseurs. L'énergie de pompage de l'eau froide provenant de groupes électrogènes. On a aussi travaillé sur le dessalement de l'eau aux îles du Cap-Vert. Elles se situent à la limite de la ceinture intertropicale, ce qui n'est pas idéal pour faire une centrale ETM, le ΔT [l'écart de température], étant inférieur à 20°C. Mais à l'époque, il y avait un problème d'eau douce énorme sur l'île de Sal. Il y avait des conflits en Afrique, et pour se rendre en Afrique du Sud, les avions faisaient escale au Cap-Vert, faisaient le plein et partaient sur Johannesburg. Ils évitaient ainsi les pays instables d'Afrique de l'Ouest. L'île de Sal disposait d'une centrale de dessalement par osmose inverse. J'y suis allé et j'ai rencontré le ministre du Développement du Cap-Vert (José Brito), pour lui proposer d'étudier un projet de centrale de dessalement ETM, car nous avons beaucoup étudié en particulier la conduite d'eau froide et le cycle ouvert. Mais

il fallait trouver un financement, et ce ministre nous a dit : « C'est très intéressant, mais le Cap-Vert est un pays pauvre, notre principale ressource étant les rentrées d'argent de nos expatriés, deux fois plus nombreux que les habitants du Cap-Vert. Je vais demander de l'argent à l'ONU pour ce projet ». Ils ont demandé de l'argent à l'ONU, qui n'est pas venu et l'étude ne s'est pas faite.

- *Vous avez travaillé sur quatre procédés concurrents : cycle ouvert, cycle fermé, centrales à terre, centrales flottantes. Comment avez-vous arbitrés entre ces différentes technologies ?*

On a travaillé, en fait, de manière très large. On a tout étudié, avec tous les industriels dont on vient de parler. Les Américains avaient lancé des études sur l'ETM, OTEC [Ocean Thermal Energy Conversion], depuis le début des années 1970. Il y avait des colloques sur les énergies marines aux États-Unis, des Ocean Energy Conferences. Les Américains, au milieu des années 1970, avaient un important « OTEC program », qui a culminé avec une centrale Mini-OTEC à Hawaï, de 50 kW, en 1978 et le navire expérimental OTEC1 au large d'Hawaï, que j'ai visité. C'était un navire de l'US Navy de 150 mètres de long, dans lequel on avait installé une centrale de puissance thermique 40MW, alimentée en eau froide par un ensemble de trois tuyaux suspendus retenus en surface par une bouée de flottabilité. L'eau était pompée à 600 ou 700 mètres. Les Américains ont dépensé beaucoup d'argent là-dessus, ils ont donc testé en vraie grandeur des échangeurs thermiques. Il y avait aussi à Hawaï le NHEL [National Hawaiian Energy Lab] où les Américains ont testé, comme nous à Brest, des géométries d'échangeurs, ainsi que des procédés de nettoyage. Ils s'intéressaient aussi à l'aquaculture, parce que l'eau froide pompée à 600 mètres de profondeur est dix fois plus riche en sels nutritifs qu'en surface. Il est donc possible de multiplier par dix la production primaire. Le plancton était consommé par un élevage d'ormeaux (les « abalones »), coquillages de haute valeur commerciale au Japon. On a donc étudié les quatre possibilités technologiques de manière comparative, et à un moment, on a mis tout ça sur la table, et on en a conclu que pour une première expérimentation, il vaudrait mieux faire une centrale à terre, à cycle ouvert ou à cycle fermé. Certains pensaient exportation, donc centrale flottante. C'est d'ailleurs la stratégie actuelle de DCNS [Direction des constructions navales].

Une étude mondiale des sites ETM avait été réalisée par l'ONU, j'avais rencontré le responsable de l'étude à New York. Les industriels d'Ergocéan ont aussi évalué le marché mondial. Leur objectif était de concourir pour la construction d'une centrale à terre de 40MWe [méga-watts électriques] en projet à Hawaï. Il est clair que le concept de centrale flottante offrait de grandes perspectives à l'export. Mais le ministère de l'Industrie et la DGRST [Direction générale de la recherche scientifique et technique] avaient du mal à converger sur le type de centrale à développer, il y a eu des errements et des lenteurs. Alors en 84, le CNEXO a finalement décidé de développer un avant-projet de centrale à terre dont on vient de parler.

• *Qu'en a-t-il été des autres énergies marines ?*

Toutes les énergies furent passées en revue. C'est quand-même de loin l'ETM, l'OTEC qui dominait. Pourquoi ? Parce que le potentiel de l'OTEC est énorme et trente-cinq ans plus tard, je persiste à croire que l'OTEC est la plus fabuleuse des énergies renouvelables. Pourquoi ? Parce qu'elle est une des très rares à pouvoir produire de l'électricité en base, 24h/24. Deuxièmement, le potentiel qu'elle représente est à l'échelle de la consommation mondiale d'énergie. En effet, la ressource thermique dans la zone intertropicale est immense. Cette ressource est renouvelable en eau chaude, chauffée par le soleil, comme en eau froide d'origine antarctique et qui se renouvelle en permanence. Il suffirait de prélever un petit peu de ces flux, sans modifier les équilibres thermiques de la planète, pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux. Mais il y a deux difficultés : la première, c'est qu'elle est localisée dans la zone intertropicale, ce qui signifie que, soit on est dans une île volcanique, où on peut faire une centrale à terre, et on a une fourniture directe d'électricité, comme à la Réunion, à la Martinique, Hawaï ; soit vous avez le concept universel, la centrale flottante, sur laquelle les Américains ont énormément travaillé. On peut fabriquer de l'électricité, ou bien de l'ammoniaque, qu'on utilise pour les engrais, ou même de l'hydrogène, pour les plus audacieux, de l'hydrogène rapatrié par « hydrogèniers » à terre, remplaçant les méthaniers. C'est un schéma qui reste valable ! Aujourd'hui, des pétroliers viennent du Moyen-Orient, passent par l'Afrique du Sud, arrivent à Rotterdam. On peut parfaitement imaginer dans l'Atlantique intertropical, de grandes barges de 100MWe produisant de l'hydrogène par électrolyse, qui serait ramenées par bateau sur Rotterdam. Ce basculement de la civilisation

vers l'hydrogène, je pense qu'on y arrivera. Ça mettra beaucoup de temps, mais si on y arrive, les renouvelables intermittentes auront un rôle à jouer, parce qu'on saura stocker l'énergie, et en termes de quantités produites, je suis persuadé que l'ETM reviendra sur le devant de la scène.

Concernant l'énergie marémotrice, La Commission européenne m'a demandé de faire un rapport sur un projet anglais d'usine implanté dans l'estuaire de la Severn. Les deux projets très préliminaires étaient grandioses 1GW et 7 GW! C'était l'équivalent du projet français Caquot de barrage de la baie du Mont-Saint-Michel¹⁰. Ce projet n'a pas eu de suites comme vous savez. Les Anglais, le libéralisme échevelé, etc., dépenser de l'argent public dans ce genre de projets ... ça n'a pas été loin. Il y a eu quand même des études assez sérieuses, mais aucun passage à l'acte. Au milieu des années 1970, un ingénieur, Philippe Ozanne, avait été embauché au CNEXO, pour s'occuper de l'impact sur l'environnement du projet EDF de l'ingénieur Caquot ... qui déboucha sur une levée de boucliers! Vouloir modifier le régime de la marée d'un des plus beaux sites de France, le Mont-Saint-Michel, c'était fou! Sans parler de la faune marine. Le CNEXO a soutenu des équipes du Muséum d'histoire naturelle qui avait une implantation à Dinard, pour réaliser des inventaires faunistiques et montrer la richesse biologique de cette baie. Nous étions en relation avec le LNH-EDF (Laboratoire national d'hydraulique de Chatou), qui avait modélisé le projet de la baie du Mont-Saint-Michel. Puis le dossier a été abandonné par EDF, qui s'est investi à fond dans le programme électro-nucléaire. En beaucoup plus modeste, le CNEXO a évalué le potentiel marémoteur de micro-centrales, forme moderne des « moulins mer ». Juste quelques dizaines de MW à récupérer ...

Passons maintenant à l'énergie de la houle. Le long de nos côtes, c'est environ 40 kW/m de front de houle. Alain Clément de l'ENSM de Nantes (devenue École centrale de Nantes) vous en a sûrement beaucoup parlé. Cette récupération de l'énergie de la houle butte sur des considérations économiques et techniques. Le prix de revient du kWh est très élevé. Les dispositifs houlomoteurs doivent être capables de résister aux tempêtes, ce qui donne des ancrages monstrueux pour les machines de surface, là où l'énergie est maximum. On peut aussi avoir des récupéra-

¹⁰ L'ingénieur des Ponts et Chaussées Albert Caquot (1881-1976) a proposé, à partir de 1939, plusieurs variantes d'un projet d'usine marémotrice titanesque comprenant le barrage sur une trentaine de kilomètres de la baie du Mont-Saint-Michel.

teurs capables de se mettre à l'abri sur le fond quand il y a une tempête. L'avantage de l'énergie de la houle, c'est qu'elle est disponible le long de nos côtes. Dans les années 1980, on était au stade des études de concepts, avec une très grande variété de dispositifs de récupération. Alors on a un concours houle avec l'ANVAR. Il consistait à proposer des concepts de récupérateurs, les idées les plus folles étaient les bienvenues. Nous avons obtenu près de deux cents réponses provenant souvent de joyeux inventeurs indépendants, souvent des vieux bonhommes, qui avaient des idées ... J'en ai reçu plusieurs dizaines dans mon bureau à Paris. À la clé, on finançait l'étude en bassin de carène du meilleur des concepts. Avec l'ANVAR, Michel Gauthier, Michel Paillard, Gilbert Damy ont fait la lecture critique de tous ces petits dossiers. On en a retenu dix, puis trois, et on a fait financer le meilleur, proposé par l'ENSM.

C'était une barge équipée d'un plan incliné sur lequel la houle déferlait et remplissait un réservoir haut qui actionnait une turbine en se vidant. Le concept ne nous paraissait pas idiot. Je me souviens qu'on a eu beaucoup d'ennuis avec monsieur Pillet, un cinglé qui contestait la procédure de sélection ... et qui a donné du fil à retordre à nos juristes. Parlez-en à Alain Clément, il s'en souviendra ! Ce monsieur Pillet, était en pétard contre la société. Il pensait que son invention était la meilleure du monde et qu'on aurait dû la retenir parmi les trois meilleures. On l'avait retenue dans les dix mais pas dans les trois. Il a toujours pensé qu'il y avait eu une main malveillante et il nous a dressé un procès ! On a dû lui donner un peu d'argent pour avoir la paix. Et ce vieux monsieur Pillet, vingt-cinq ans plus tard, s'est invité dans la réunion publique de présentation de mon rapport du CESER [Conseil économique, social et environnemental régional] « Les énergies marines en Bretagne, à nous de jouer » en 2009 devant une docte assemblée de cent cinquante invités à Lorient. Il est venu me voir à la fin : « Alors, cette histoire d'énergie de la houle, hein, vous me devez toujours de l'argent ! » J'étais très embêté, vingt-cinq ans après, d'avoir à discuter avec lui ...

- *Vous avez beaucoup parlé d'international. Quelle était la place du CNEXO dans cette dynamique ?*

Sans hésitation, numéro 1 en Europe. Les pays du second groupe, Hollande, Royaume-Uni, ont conduit des études de faisabilité de centrales de petites puissances, avec une aide réduite de leurs gouvernements, mais la France était totalement leader sur les énergies marines renouvelables

dans cette période-là, c'est sans doute pour ça que la Communauté européenne nous a demandé un rapport sur ce sujet, que je me suis chargé de rédiger. Les pays du premier groupe, c'était les États-Unis, le Japon et la France. Les États-Unis se considéraient comme les plus forts car ils ont dépensé de l'ordre de 200 millions de dollars sur l'ETM, avec OTEC1, puis Mini-OTEC. Des entreprises comme Lockheed, Westinghouse et General Electric se sont investies et ont demandé beaucoup d'argent. Ces entreprises voyaient se profiler un très gros business mondial de construction de grosses centrales flottantes de 100 MWe. Nous étions très attentifs à ce qui se passait aux États-Unis. En 1974, notre collègue Georges Massart avait fait un petit rapport sur les recherches américaines en ETM. Elles étaient en partie conduites sous l'égide de la NOAA [National Oceanic and Atmospheric Administration] avec laquelle le CNEXO avait un accord de coopération. Coopération multidisciplinaire en océanographie physique, en aquaculture et surtout dans le domaine des ressources minérales profondes (hydrothermalisme et nodules polymétalliques). Il y avait une grande réunion annuelle au plus haut niveau entre nos deux instituts. On faisait aussi des campagnes océanographiques en commun. Le CNEXO avait un attaché scientifique, à l'Ambassade de France à Washington, Jean Jarry, devenu par la suite le directeur du centre de Toulon. C'est lui qui avait attiré notre attention sur l'ETM.

Pour ce qui est de la houle, on avait constaté que les Anglais travaillaient beaucoup sur ce sujet. Je suis allé à un congrès à Londres à la fin des années 1970, consacré à la *wave energy*. J'ai constaté qu'ils avaient un programme national important. On s'est dit qu'il fallait qu'on s'intéresse à la question, d'où l'idée d'un concours houle pour canaliser les inventions. Et de diverses évaluations du potentiel énergétique le long de nos côtes. Le PDG du CNEXO de l'époque [1978-1982] était Gérard Piketty, un brillant ingénieur des Mines, auparavant directeur des carburants. C'était un visionnaire, il a beaucoup poussé notre implication future dans les énergies marines, et c'est lui qui m'a nommé dans ma responsabilité du programme ETM. Notre mission était de regarder ce qu'il se passait dans le monde, et d'imaginer un programme français dans le domaine des énergies marines. C'est pour ça que je suis allé un peu à droite à gauche au Japon, en Grande Bretagne et aux États-Unis. Alors assez rapidement, on a vu que la houle était une énergie très diffuse, que les Anglais avaient fait certes quelques réalisations mais qui ne tenaient pas dans la houle de tempête, bon ...

- *Aviez-vous un intérêt personnel pour les énergies marines avant de devenir le responsable du programme au CNEXO ?*

Avant de faire l'ENSTA, j'ai fait une maîtrise de physique avec un certificat d'océanographie, et j'ai eu Henri Lacombe comme professeur. Henri Lacombe, c'était la sommité française en océanographie physique. Il a écrit un petit bouquin en 1968, à l'époque où j'étais étudiant, qui s'appelait *Les énergies de la mer*. Je l'ai lu en long, en large et en travers ! Il traitait de physique, mais très peu des dispositifs de récupération. Et puis j'allais aux conférences de l'Institut océanographique écouter Romanovsky, un ingénieur-docteur, professeur d'océanographie. Il a écrit en 1950 un petit livre : *La mer source d'énergie* qui parlait entre autres du potentiel marémoteur de la baie de Fundy, où on trouve les plus grandes marées du monde (18 m d'amplitude !). C'était un peu un méli-mélo, avec peu de fondements scientifiques, mais ce livre était bien fait et m'intéressait personnellement. J'ai passé une bonne partie de mon enfance à faire du mécano ! Et puis il y avait aussi le *Larousse encyclopédique, La mer*, qui date de 1953. C'est un bouquin formidable, qui traite absolument de tous les sujets. Un chapitre sur les énergies marines relate les exploits technologiques de Georges Claude avec la centrale prototype de Cuba, le navire ETM Tunisie, la centrale d'Abidjan ... J'ai une profonde admiration pour ce génie français, inventeur de l'Air Liquide.

- *Dans quelle mesure le contexte économique des chocs pétroliers et les revendications écologistes ont-ils motivé le choix du CNEXO pour valoriser les énergies marines à la fin des années 1970 et dans les années 1980 ?*

Les chocs pétroliers de 1973 et 1979 ont stimulé la recherche sur les énergies marines renouvelables. On se posait d'abord la question de leur impact économique potentiel. Impact industriel au niveau de la production, impact énergétique pour des communautés isolées comme Tahiti ... Le CNEXO était attentif à l'impact sur l'environnement. Aujourd'hui, on a un peu tendance à hypertrophier les conséquences des impacts sur l'environnement, ce qui bloque des projets. À l'époque, la conscience écologique était faible. On était un peu dans l'inconnu. Par exemple, le principal projet du COMES [Commissariat à l'énergie solaire] était la centrale d'Odeillo : une haute tour concentre les rayons du soleil réfléchis par un champ de miroirs répartis sur une assez grande surface. Les rayons

réfléchis du soleil ne doivent pas perturber la circulation aérienne, et il faut éviter de griller des oiseaux . . . Quant aux éoliennes, elles ont un fort impact visuel, et certaines se sont effondrées. Une centrale ETM ne cause pas de dommage à l'environnement. Et la mer n'est pas une poubelle! Je vous rappelle que dans les années 1960 et 1970, on a rejeté beaucoup de matières nucléaires dans la Manche! C'est pour vous dire le faible niveau de conscience écologique qu'on avait à l'époque! On a arrêté ces déversements dans le milieu des années 1970, quand on a pris conscience que la mer était un milieu à protéger. Et on a commencé à faire des études d'impact. Le programme nucléaire était tellement cher qu'on pouvait bien dépenser quelques millions sur l'environnement. C'était vu comme ça par EDF : « Ça passera mieux localement ». Mais aujourd'hui, l'impact sur l'environnement serait mis au centre. Il y a eu une prise de conscience progressive. Dans les années 1970-1980, on ne mettait pas en avant le caractère non polluant ou décarboné de ces nouvelles formes d'énergie. On mettait en avant l'énormité de la ressource énergétique qui appartenait aux riverains, ou à tout le monde dans la zone maritime internationale.